

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.793, 551.510.53

**Спектроскопические измерения содержания O_3 и NO_2
в атмосфере: коррекция наземного метода и результаты
сопоставления с данными спутниковых измерений**

Д.В. Ионов, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поберовский*

*Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1*

Поступила в редакцию 2.04.2015 г.

Представлены результаты ежедневных наблюдений за общим атмосферным содержанием O_3 и NO_2 в районе Санкт-Петербурга на основе автоматизированных наземных зенитных измерений спектров рассеянного видимого солнечного излучения. Проведено сопоставление результатов наблюдений в 2009–2013 гг. с данными спутниковых измерений приборами GOME (ERS-2), SCIAMACHY (ENVISAT) и OMI (AURA). Анализ выявленных расхождений между данными спутниковых и наземных измерений позволил усовершенствовать наземный метод (методика DOAS), сократив средние расхождения до ~2 и ~20% для содержаний O_3 и NO_2 соответственно. Оставшиеся расхождения могут быть устранены при учете сезонной изменчивости рассчитываемых факторов воздушной массы в наземном методе.

Ключевые слова: DOAS-измерения, содержание O_3 в атмосфере, содержание NO_2 в атмосфере; DOAS measurements, O_3 atmospheric content, NO_2 atmospheric content.

Введение

Долговременные высокоточные измерения атмосферного содержания озона O_3 и двуокиси азота NO_2 представляют интерес в связи с актуальной задачей выявления возможных естественных и антропогенных изменений газового состава стратосферы. Одним из методов наблюдений, позволяющих осуществлять эффективный мониторинг этих атмосферных составляющих в различных регионах земного шара и разнообразных погодных условиях, является наземная спектрометрия рассеянного из зенита УФ- и видимого солнечного излучения.

В частности, в рамках международной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <http://www.ndacc.org>) уже несколько десятилетий функционирует сегмент измерений в УФ- и ВО (УФ- и видимая области спектра, UV-visible network), состоящий из более чем 35 сертифицированных наземных приборов, размещенных по всему земному шару и выполняющих непрерывные наблюдения за атмосферным содержанием O_3 и NO_2 . NDACC (бывшая NDSC: Network for the Detection of Stratospheric Change) представляет собой глобальную сеть станций долговременных

наблюдений газового состава атмосферы. Среди приборов NDACC группы УФ-ВО-измерений ведущая роль принадлежит сети станций, оснащенных французской аппаратурой SAOZ (Système d'Analyse par Observation Zénithale [1]). SAOZ представляет собой дифракционный спектрометр с многоканальным фотоприемником излучения типа ПЗС (прибор с зарядовой связью), осуществляющий измерения рассеянного из зенита УФ- и видимого солнечного излучения. Основным режим наблюдений SAOZ – утренние и вечерние измерения на восходе и заходе Солнца, в сумерки. Начиная с конца 80-х – начала 90-х гг. приборы SAOZ, а также аналогичная им по геометрии и принципу измерений аппаратура были установлены на многих станциях (см., например, <http://saoz.obs.uvsq.fr>). В частности, на территории бывшего СССР подобные регулярные измерения были начаты на Иссык-Куле в Киргизии [2], в Звенигороде [3], а также в Салехарде и Жиганске [4].

С 2004 г. регулярные наблюдения за атмосферным содержанием O_3 и NO_2 на основе зенитных измерений рассеянного видимого излучения выполняются и в Санкт-Петербурге, в НИИ физики им. В.А. Фока (НИИФ) СПбГУ (Петродворец) [5]. В настоящей статье проведено сопоставление результатов ежедневных наземных измерений с одновременными спутниковыми данными о содержании O_3 и NO_2 в районе Санкт-Петербурга, получены оценки их взаимного согласия, определены и устранены некоторые причины наблюдаемых расхождений.

* Дмитрий Викторович Ионов (ionov@troll.phys.spbu.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (tim@JT14934.spb.edu); Анатолий Васильевич Поберовский (avpob@troll.phys.spbu.ru).

1. Методика и аппаратура наземных измерений

Используемый авторами метод наблюдений и основные элементы методики интерпретации результатов измерений для определения атмосферных содержаний O_3 и NO_2 подробно изложены ранее [5]. Следует отметить, что спектральная аппаратура, описанная в [5], была в дальнейшем существенно модернизирована. Ниже рассмотрены характеристики аппаратуры, применяемой авторами для непрерывных измерений с начала 2009 г., а также некоторые особенности методики их интерпретации, не представленные ранее [5]. К последним нужно отнести следующие.

1. Одновременное использование в алгоритме спектральных коэффициентов поглощения O_3 и NO_2 при двух различных температурах, 223 и 243 К для O_3 и 220 и 296 К для NO_2 . Данная процедура, являющаяся одной из стандартных опций алгоритма WinDOAS [6], предполагает частичный учет температурной зависимости коэффициентов поглощения с высотой, с тем чтобы выделить основной вклад стратосферного содержания при температуре ~ 220 К (при этом соответствующие разным температурам коэффициенты принимаются взаимно ортогональными).

2. Учет дополнительных помех, пропорциональных измеряемому сигналу (интенсивности) и обусловленных наличием так называемого паразитного света (засветки) прибора и темнового тока (шума) приемника. Для этого в основное уравнение (закон Бугера–Ламберта–Бера в экспоненциальной форме) включается дополнительный член (*offset*(λ)):

$$I(\lambda) - \text{offset}(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\sum q_i \sigma_i(\lambda) - P(\lambda)\right). \quad (1)$$

Здесь $I(\lambda)$ – измеренная интенсивность на длине волны; $I_0(\lambda)$ – референтный (опорный) спектр; q_i – эффективное содержание i -й компоненты на трассе распространения излучения; $\sigma_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения i -й компоненты; $P(\lambda)$ – полином вида $\sum d_k \lambda^k$ для учета вклада рэлеевского и аэрозольного ослабления. При этом параметр *offset*(λ) задан в форме функции

$$\text{offset}(\lambda) = (a + b(\lambda - \lambda_0) + c(\lambda - \lambda_0)^2) \bar{I},$$

где λ_0 – центральная длина волны рабочего спектрального интервала; \bar{I} – средняя интенсивность в интервале; a , b и c – подбираемые параметры. В алгоритме DOAS, реализованном для интерпретации данных измерений НИИФ СПбГУ начиная с 2009 г., для описания спектральной зависимости параметра *offset*(λ) используется полином 0-го порядка (т.е. коэффициенты b и c заданы нулевыми), а в качестве функции $P(\lambda)$ – полином 5-й степени.

Основные характеристики спектральной аппаратуры, используемой для регулярных измерений в Санкт-Петербурге (Петродворец) с 2009 г., приведены ниже.

Оптическая схема	асимметричная скрещенная Черни–Тернера
Приемник излучения	линейка ПЗС из 3648 элементов
Разрядность АЦП	14 бит
Ширина входной щели	50 мкм
Дифракционная решетка	1200 штр./мм
Время регистрации спектра	3,8 мс – 60 с
Спектральный диапазон	400–610 нм
Спектральное разрешение	0,6 нм
Угловое поле зрения	10°

Основой прибора является коммерческий спектрометр HR4000 фирмы Ocean Optics Inc. (<http://oceanoptics.com>). В качестве диспергирующего элемента в спектрометре используется голографическая дифракционная решетка, а приемником излучения служит многоканальный фотоприемник излучения типа ПЗС. По сравнению с применяемой ранее [5] новая измерительная аппаратура характеризуется более широким спектральным интервалом (400–610 вместо 428–515 нм), более высоким спектральным разрешением (~ 0,6 вместо ~ 1,3 нм) и существенно меньшим временем регистрации (в среднем 1–3 с вместо 1 мин). В целом основные параметры прибора близки к техническим характеристикам аппаратуры SAOZ (фотоприемник на основе ПЗС, спектральный интервал ~ 300–600 нм, спектральное разрешение ~ 1 нм) [1].

Для единообразия и однородности ряда наземных DOAS-измерений в НИИФ СПбГУ эффективное содержание O_3 и NO_2 определяется в том же спектральном интервале, который использовался при обработке результатов измерений прежней аппаратуры, действующей в период 2004–2009 гг. (428–515 нм). Полученное эффективное (наклонное) содержание преобразуется в искомое вертикальное (общее содержание в вертикальном столбе атмосферы) с помощью моделируемых коэффициентов, так называемых факторов воздушной массы (AMF, air mass factor). Коэффициенты AMF рассчитываются в модели переноса излучения в атмосфере (SCIATRAN [7]) с использованием характерных среднегодовых профилей вертикального распределения O_3 и NO_2 , а также давления и температуры в атмосфере. Серии измерений вертикального содержания, выполненных на восходе и заходе Солнца, усредняются в диапазоне зенитного угла Солнца 90–91° (интервал сумеречных измерений сужен в сторону низкого Солнца с тем, чтобы минимизировать возможный вклад антропогенного загрязнения тропосферы вблизи Санкт-Петербурга). Для учета суточного цикла содержания NO_2 в стратосфере полученные утренние и вечерние оценки вертикального содержания приводятся ко времени местного полудня с помощью фотохимической модели аналогично [5, 8, 9]. В целом погрешности рассматриваемых наземных измерений вертикального содержания O_3 и NO_2 определяются не столько погрешностью определения их наклонного содержания (которое составляет в среднем 0,7–0,8 и 1,4–2,0% для O_3 и NO_2 соответственно), сколько неопределенностью используемых коэффициентов AMF, за счет естественной изменчивости состояния атмосферы

(главным образом вертикального распределения содержаний O_3 и NO_2). Суммарные погрешности для используемого наземного метода составляют, по некоторым оценкам, 7 и 21% для содержания O_3 и NO_2 соответственно (см., например, [10]). В условиях сильно загрязненной тропосферы, т.е. повышенного содержания NO_2 в приземном слое, оценка погрешности определения содержания NO_2 во всей толще атмосферы возрастает до 40% [8].

2. Сопоставление с данными спутниковых измерений

Полученные в период с 2009 по 2013 г. результаты ежедневных наземных измерений содержания O_3 и NO_2 сравнивались с данными ближайших спутниковых измерений. В сопоставлении использовались данные таких спутниковых приборов, как GOME (Global Ozone Monitoring Experiment [11], спутник ERS-2), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY [12], спутник ENVISAT) и OMI (Ozone Monitoring Experiment [13], спутник AURA). Эти сканирующие спектрометры позволяют осуществлять глобальный мониторинг пространственного распределения содержания O_3 и NO_2 в атмосфере на основе надирных измерений уходящего видимого излучения с горизонтальным разрешением от ~ 300 км для GOME, до ~ 60 для SCIAMACHY и ~ 20 для OMI. В настоя-

щей статье использовались данные GOME версии ESA (O_3 и NO_2 , <http://atmos.eoc.dlr.de/gome>), SCIAMACHY версии ESA (O_3 , <http://atmos.caf.dlr.de/sciamachy>) и IUPB (NO_2 , http://www.iup.uni-bremen.de/does/scia_no2_data_acve.htm) и данные OMI версии NASA (O_3 и NO_2 , <http://avdc.gsfc.nasa.gov>) над ближайшими к Санкт-Петербургу точками. На широте Санкт-Петербурга измерения тремя указанными приборами выполнялись практически ежедневно (измерения GOME прекратили в июле 2011 г., SCIAMACHY – в апреле 2012 г., OMI продолжает работу в настоящее время). В среднем для отобранных спутниковых данных время пролета и удаленность подспутниковой точки от Санкт-Петербурга составили $12:30 \pm 0:30$ и (140 ± 110) км для GOME, $12:00 \pm 0:30$ и (40 ± 25) км для SCIAMACHY, $13:20 \pm 0:45$ и (25 ± 25) км для OMI. Оценки погрешности определения содержания O_3 составляют 2–5% для данных GOME, SCIAMACHY [14] и OMI [15]. Оценки погрешности определения содержания NO_2 в отсутствие тропосферного загрязнения составляют 5–10% для данных GOME [14], SCIAMACHY [16] и OMI [17]; в условиях загрязненной тропосферы погрешность может достигать 50% [17].

Пример сопоставления результатов одновременных наземных и спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга представлен на рис. 1 в виде рядов среднесуточных значений содержаний O_3 и NO_2 по данным наземных (СПбГУ) и спутниковых (OMI) наблюдений в 2009–2013 гг.

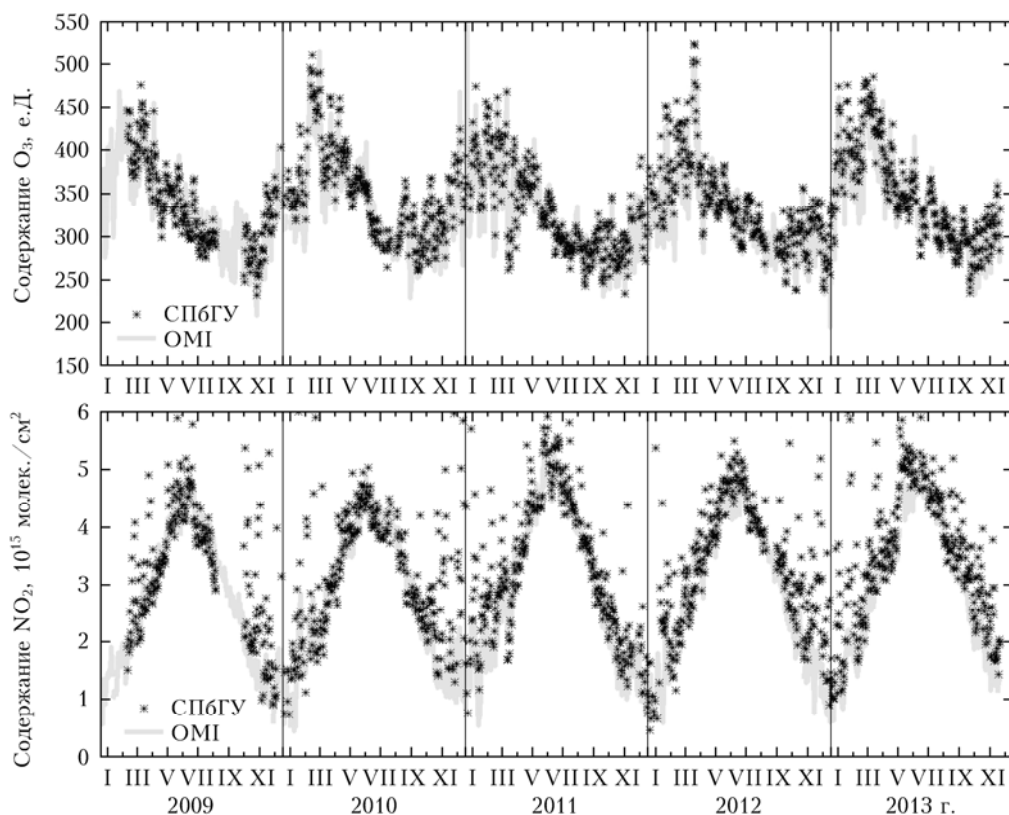


Рис. 1. Данные наземных (СПбГУ) и спутниковых (OMI) измерений O_3 и NO_2 в районе Санкт-Петербурга (Петродворец) в 2009–2013 гг. (для учета суточного цикла содержания NO_2 результаты измерений приведены ко времени местного полудня)

Обе системы измерений воспроизводят характерную для данного широтного пояса сезонную изменчивость стратосферных содержаний O_3 и NO_2 : максимальное содержание O_3 весной ~ 450 е.Д. и минимальное осенью ~ 250 е.Д., максимальное дневное содержание NO_2 в середине лета $\sim 5 \cdot 10^{15}$ молек./см² и минимальное в середине зимы $\sim 1 \cdot 10^{15}$ молек./см². В данных измерений NO_2 заметны эпизоды существенных расхождений, заключающиеся в заметном превышении результатов наземных измерений относительно спутниковых. Такое высокое содержание NO_2 , эпизодически регистрируемое наземным методом, связано с его повышенным содержанием в приземном слое, иногда наблюдаемым несмотря на сумеречную геометрию наземных измерений и значительное удаление от основных источников антропогенного загрязнения воздуха в центральной части Санкт-Петербурга.

В отличие от результатов наземных наблюдений, представляющих собой оценку общего содержания NO_2 в вертикальном столбе (хотя и преимущественно в стратосфере), используемые здесь данные спутниковых измерений ОМІ в большей степени характеризуют стратосферную часть общего содержания благодаря специальным алгоритмам коррекции данных с учетом тропосферного вклада [18].

3. Анализ расхождений. Коррекция наземного метода

Результаты сопоставления данных спутниковых и наземных измерений в виде оценок средних расхождений и коэффициентов корреляции приведены в табл. 1. В сравнении использованы данные измерений спутниковых приборов GOME, SCIAMACHY и ОМІ. Для единообразия, с учетом прекращения работы приборов GOME и SCIAMACHY, рассматриваемый массив сопоставляемых данных ограничен периодом с января 2009 по июль 2011 г. Согласно приведенным в табл. 1 оценкам, результаты наземных измерений озона в среднем на 12–13% ниже спутниковых данных для всех рассматриваемых приборов (см. столбец «версия 1» в табл. 1). Стандартные отклонения от среднего расхождения составляют 4–5%, а коэффициенты корреляции – 0,91–0,95. Общий для трех различных спутниковых приборов характер средних расхождений, относительно низкие величины

стандартных отклонений и высокие коэффициенты корреляции указывают на систематическую ошибку в результатах наземных измерений содержания озона. В отличие от O_3 данные наземных измерений NO_2 оказываются существенно выше спутниковых – в среднем на 20–30% (см. столбец «версия 1» в табл. 1); при этом наблюдаются довольно высокие стандартные отклонения от средних значений расхождения (50–80%) и относительно низкие коэффициенты корреляции (0,5–0,7). Основной вклад в рассогласование сравниваемых данных измерений NO_2 вносит отмеченное выше аномально высокое содержание, регистрируемое наземным методом в условиях повышенной концентрации NO_2 в приземном слое.

Более детальный анализ результатов сопоставлений выявил следующий ряд параметров алгоритма интерпретации данных наземных измерений, вносящих систематическую ошибку в оценку содержания озона и требующих соответствующей коррекции:

1. Характерная температура спектральных коэффициентов поглощения O_3 и NO_2 . Более близкое согласие результатов наземных измерений со спутниковыми данными достигается при использовании только «холодных» коэффициентов поглощения, т.е. соответствующих средней температуре стратосферы (~ 220 К). Выявлено, что учет одновременно двух коэффициентов поглощения («теплого» и «холодного») приводит к увеличению расхождений между данными спутниковых и наземных измерений.

2. Степень полинома, описывающего эффекты рэлеевского и аэрозольного ослабления [$P(\lambda)$ в уравнении (1)]. Использование полинома 3-й степени вместо 5-й, стандартно выбранной при интерпретации наземных измерений, сокращает расхождение со спутниковыми данными.

3. Степень полинома, описывающего инструментальные помехи спектральных измерений [$offset(\lambda)$ в уравнении (1)]. Использование полинома 2-й степени вместо 0-й, стандартно используемой при интерпретации наземных измерений, сокращает расхождение со спутниковыми данными.

В качестве иллюстрации влияния каждой из этих модификаций алгоритма обработки результатов наземных измерений ниже приведены соответствующие им изменения эффективного (или так называемого наклонного) содержания O_3 и NO_2 .

Таблица 1

Значения среднего отклонения Δ и стандартного отклонения от среднего σ для разницы «спутник – наземный прибор» в относительных единицах (%), а также коэффициента корреляции R

Газ	Спутниковый прибор	Δ		σ		R	
		Версия 1	Версия 2	Версия 1	Версия 2	Версия 1	Версия 2
O_3	GOME	+13,3	–0,6	4,8	5,4	0,93	0,94
	SCIAMACHY	+13,0	–0,8	3,9	4,8	0,95	0,95
	OMI	+11,5	–2,7	5,4	6,2	0,91	0,92
NO_2	GOME	–19,4	–16,6	77,7	78,0	0,47	0,46
	SCIAMACHY	–17,1	–14,0	51,4	52,9	0,65	0,64
	OMI	–30,7	–26,4	66,7	61,8	0,69	0,69

Эти оценки получены на основе анализа одного из измерений на заходе Солнца (зенитный угол 90°) 17 февраля 2011 г. и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние различных параметров алгоритма интерпретации наземных измерений на оценку содержания O_3 и NO_2 (q) в атмосфере: температура коэффициентов поглощения ($T_{\sigma(O_3)}$, $T_{\sigma(NO_2)}$), степень полинома $P(\lambda)$ и степень полинома $offset(\lambda)$

Газ	q , молек./см ²	$T_{\sigma(O_3)}$	$T_{\sigma(NO_2)}$	$P(\lambda)$	$offset(\lambda)$	Σ^*
O_3	$13,3 \pm 0,5 \cdot 10^{19}$	+13%	-1%	-8%	-4%	+21%
NO_2	$6,5 \pm 0,4 \cdot 10^{16}$	-3%	-2%	+6%	0%	-15%

* Одновременно учитываются все модификации алгоритма.

Исходный выбор параметров здесь и далее обозначен как версия 1, а параметры и результаты работы модифицированного алгоритма – версия 2. В табл. 2 даны результат определения эффективного содержания O_3 и NO_2 (версия 1), а также его относительное изменение с учетом рассмотренных каждой отдельно и всех вместе модификаций ((версия 2 – версия 1)/версия 1). Эти модификации сказываются на результате определения содержания O_3 и NO_2 разнонаправленно. Так, определяемая ве-

личина содержания O_3 увеличивается при переходе к использованию только «холодного» коэффициента поглощения O_3 (+13%) и уменьшается при выборе полинома $P(\lambda)$ меньшей степени (-8%). Величина NO_2 , наоборот, растет при уменьшении степени полинома $P(\lambda)$ (+6%) и уменьшается при использовании «холодного» коэффициента поглощения O_3 (-3%). В целом при переходе от алгоритма версии 1 к версии 2 для рассмотренного измерения оценка содержания O_3 увеличивается на 21%, а оценка содержания NO_2 уменьшается на 15%.

В табл. 1 приведены оценки расхождений между спутниковыми данными о содержании O_3 и NO_2 и результатами наземных измерений, обработанными с помощью модифицированного алгоритма (столбцы «версия 2») в 2009–2011 гг. Новые наземные данные о содержании O_3 оказываются существенно ближе к спутниковым: средние расхождения составляют 1–3% вместо 12–13%. Наземные данные о содержании NO_2 также стали несколько ближе к спутниковым: среднее расхождение сократилось до 14–26% вместо 17–31%. При этом оценки стандартных отклонений от средних расхождений и коэффициенты корреляции между данными наземных и спутниковых измерений практически не изменились.

На рис. 2 представлен сезонный ход расхождений в виде их среднемесячных значений, рассчитанных для сопоставления с данными спутникового

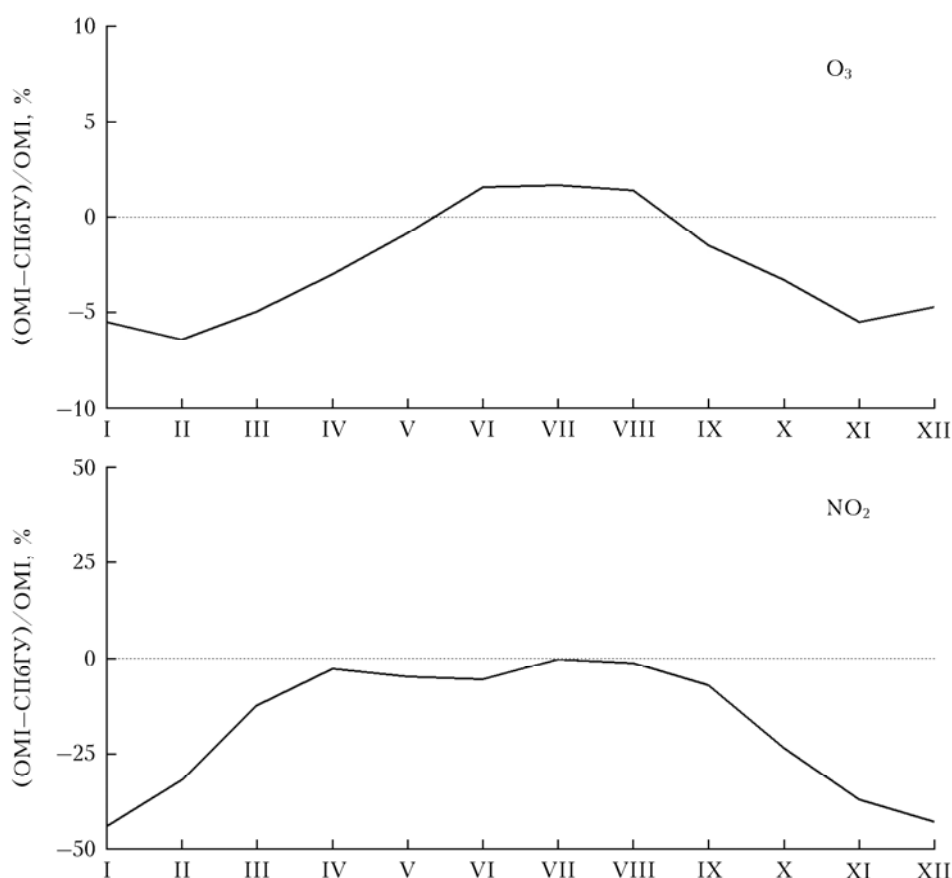


Рис. 2. Сезонный ход расхождений между данными спутниковых (OMI) и наземных (СПБГУ, версия 2) измерений O_3 и NO_2 в виде среднемесячных значений, рассчитанных для периода сопоставлений в 2009–2013 гг.

прибора OMI в 2009–2013 гг. Оценки среднего отклонения Δ , стандартного отклонения от среднего σ и коэффициента корреляции R составили $-2,8\%$; $5,5\%$; $0,92$ и $-32,0\%$; $63,5\%$; $0,77$ для сопоставления с данными измерений O_3 и NO_2 соответственно. В среднем расхождения между данными спутниковых и наземных измерений (версия 2) существенно зависят от времени года и демонстрируют заметное превышение результатов наземных измерений над спутниковыми данными в зимнее время: до 5% для O_3 и до 45% для NO_2 . Высокие зимние значения NO_2 в данных наземных измерений объясняются, главным образом, вкладом антропогенно загрязненной тропосферы (исключенным в спутниковых данных). При этом с апреля по сентябрь среднее расхождение со спутниковыми данными не превышает 5% (см. рис. 2). Вместе с тем характерные сезонные вариации расхождений, наблюдаемые в измерениях NO_2 и O_3 , могут быть также связаны с пренебрежением сезонной изменчивости (AMF) в наземном методе (в отличие от спутниковых алгоритмов, где эта зависимость учитывается). Учет сезонной изменчивости AMF в наземных DOAS-измерениях O_3 и NO_2 может существенно улучшить согласие со спутниковыми данными и, в частности, в настоящее время рекомендован к использованию на станциях международной сети NDACC. Так, аналогичное сопоставление спутниковых данных с результатами наземных DOAS-измерений O_3 на ряде станций SAOZ показало существенное сокращение расхождений при использовании рекомендованного NDACC климатологического набора данных AMF [19]. Следует отметить, что характер сезонной изменчивости расхождений между данными спутниковых и наземных измерений O_3 , выявленный нами (см. рис. 2), в целом идентичен результатам аналогичных сопоставлений, представленных в [19], где также показано, что эта изменчивость может быть существенно сокращена при использовании рекомендованного расчета AMF.

Заключение

Наземные зенитные измерения спектров рассеянного видимого солнечного излучения позволяют реализовать относительно простой метод автоматизированных всепогодных наблюдений за общим содержанием O_3 и NO_2 в атмосфере (преимущественно в стратосфере). Подобные измерения непрерывно осуществляются вблизи Санкт-Петербурга (Петродворец) начиная с 2004 г. и служат для определения атмосферного содержания O_3 и NO_2 дважды в сутки (на восходе и заходе Солнца). Часть накопленного массива наземных данных (2009–2013 гг.), полученных по измерениям действующей в настоящее время аппаратуры, сопоставлена с данными спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга. Анализ сопоставлений выявил систематические расхождения, которые были частично устранены после внесения поправок в алгоритм интерпретации наземных DOAS-измерений. Так, в переработанных результатах наземных измерений в 2009–2011 гг. среднее отклонение от спутниковых данных сократилось

с $12-13$ до $1-3\%$ для содержания O_3 и с $17-31$ до $14-26\%$ для содержания NO_2 . Достигнутое сокращение расхождений в основном обусловлено выбором характерной температуры спектрального коэффициента поглощения озона и степени полинома, отвечающего за неселективное ослабление излучения в методике DOAS. Оставшееся расхождение имеет выраженный сезонный ход и может быть устранено использованием в наземном методе климатических воздушных масс (например, рекомендованных для станций международной сети NDACC [19]). Полученные нами результаты позволят в дальнейшем переработать весь массив наземных DOAS-измерений и сформировать однородный непрерывный ряд наблюдений за общим атмосферным содержанием O_3 и NO_2 в районе Санкт-Петербурга с 2004 г. и по настоящее время.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00897, проведение и анализ результатов наземных измерений NO_2) и Российского научного фонда (проект № 14-17-00096, проведение и анализ результатов наземных измерений O_3).

1. Pommereau J.-P., Goutail F. O_3 and NO_2 ground-based measurements by visible spectrometry during arctic winter and spring 1988 // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15, N 18. P. 891–894.
2. Сняжков В.П., Спекторов Л.А. Содержание озона и двуокиси азота в атмосфере северного Тянь-Шаня // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1987. Т. 23, № 1. С. 20–25.
3. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO_2 на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
4. Хайкин С.М., Игнатьев Д.В., Дорохов В.М., Поморо Ж.-П., Мевиль О., Гутайл Ф., Ламберт Ж.-К. Исследования влияния геофизических факторов на измерения O_3 и NO_2 спутниковым прибором GOME. Сравнения с наземными измерениями прибором SAOZ в полярных широтах // *Исслед. Земли из космоса.* 2003. № 3. С. 1–11.
5. Поберовский А.В., Шашкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М. Вариации содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 4. С. 112–120.
6. Fayt C., van Roozendael M. WinDOAS 2.1 software user manual. Belgian Institute for Space Aeronomy. Brussels. 2001. URL: <http://uv-vis.aeronomie.be/software>
7. Rozanov V.V., Buchwitz M., Eichmann K.-U., de Beek R., Burrows J.P. SCIATRAN – a new radiative transfer model for geophysical applications in the 240–2400 nm spectral region: The pseudo-spherical version // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29, N 11. P. 1831–1835.
8. Ионов Д.В., Поберовский А.В. Двуокись азота в воздушном бассейне Санкт-Петербурга: дистанционные измерения и численное моделирование // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 4. С. 422–433.
9. Ионов Д.В., Киевцевская М.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Содержание NO_2 в стратосфере по данным наземных измерений солнечного ИК-излучения // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2013. Т. 49, № 5. С. 565–575.
10. Roozendael Van M., Maziere De M., Simon P.S. Ground-based visible measurements at the Jungfraujoch station

- since 1990 // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1994. V. 52, N 3/4. P. 231–240.
11. *Burrows J.P., Weber M., Buchwitz M., Rozanov V.V., Ladstätter-Weissenmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M.* The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56, N 2. P. 151–175.
 12. *Bovensmann H., Burrows J.P., Buchwitz M., Frerick J., Noël S., Rozanov V.V., Chance K.V., Goede A.P.H.* SCIAMACHY – Mission objectives and measurement modes // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56, N 2. P. 127–150.
 13. *Levelt P.F., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W., van den Oord G.H.J., Bhartia P.K., Tamminen J., Haan J.F., Veefkind J.P.* Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. IGRSD2. P. 1199–1208.
 14. *Loyola D., Zimmer W., Kiemle S., Valks P., Pedergnana M.* Product user manual for GOME total columns of ozone, NO₂, tropospheric NO₂, BrO, SO₂, H₂O, HCHO, OCIO, and cloud properties // DLR/GOME/PUM/01. Iss./Rev. 2E. 2012. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt. Oberpfaffenhofen. Germany. URL: http://earth.esa.int/documents/700255/1525725/DLR_GOME_PUM_2E.pdf
 15. *Bhartia P.K., Wellemeyer C.W.* OMI TOMS-V8 Total O₃ Algorithm // Algorithm Theoretical Baseline Document: OMI ozone products. Ed. by P.K. Bhartia. V. 2. ATBD-OMI-02. version 2.0. 2002. URL: <http://eosps.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/ATBD-OMI-02.pdf>
 16. *Richter V., Eyring J., Burrows P., Bovensmann H., Lauer A., Sierk B., Crutzen P.J.* Satellite measurements of NO₂ from international shipping emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L23110. DOI: 10.1029/2004GL020822.
 17. *Boersma K.F., Bucsela E.J., Brinksma E.J., Gleason J.F.* NO₂ // Algorithm Theoretical Baseline Document: OMI trace gas algorithms. Ed. by K. Chance. V. 4. ATBD-OMI-04. version 2.0. 2002. URL: <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/ATBD-OMI-04.pdf>
 18. *Bucsela E., Celarier E., Wenig M., Gleason J., Veefkind P., Boersma K.F., Brinksma E.* Algorithm for NO₂ vertical column retrieval from the Ozone Monitoring Instrument // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. IGRSD2. P. 1245–1258.
 19. *Hendrick F., Pommereau J.-P., Goutail F., Evans R.D., Ionov D., Pazmino A., Kyrö E., Held G., Eriksen P., Dorokhov V., Gil M., Van Roozendaal M.* NDACC/SAOZ UV-visible total ozone measurements: Improved retrieval and comparison with correlative ground-based and satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 5975–5995. DOI: 10.5194/acp-11-5975-2011.

D.V. Ionov, Yu.M. Timofeyev, A.V. Poberovskii. **Spectroscopic measurements of O₃ and NO₂ atmospheric content: Improvements to ground-based method and comparison with the data of satellite observations.**

The results of daily observations of O₃ and NO₂ atmospheric total content around St. Petersburg, retrieved from the automatic ground-based measurements of zenith-sky scattered visible solar radiation, are presented. The measurements acquired in 2009–2013 are compared with the data of satellite observations by the GOME (ERS-2), SCIAMACHY (ENVISAT) and OMI (AURA) instruments. Investigation of the disagreement revealed between the data of satellite and ground-based measurements allowed us to improve the ground-based method (DOAS technique) and reduce the average difference down to ~2 and ~20% for O₃ и NO₂ content, respectively. Remaining differences may be further reduced if the seasonal variability of calculated air mass factors is taken into account in the ground-based method.